

A talaj víztartókéesség-függvény (pF-görbe) talajtulajdonságok alapján történő becslésének továbbfejlesztése

RAJKAI KÁLMÁN és KABOS SÁNDOR

Magyar Tudományos Akadémia Talajtani és Agrokémiai Kutató Intézete, Budapest

A talaj víztartókéesség-függvénye (pF-görbe) a talajban tározott víz hasznosulását leíró modellekben, és a száraz időszakokkal megszakított növénytermesztés kockázatelemzésével kapcsolatban egyre nagyobb hangsúlyt kap.

Előzmények, célkitűzések

Magyarországon közel 20 éve alakították ki és vezették be a talajok pF-görbéjének meghatározására szolgáló mintavételi és mérési eljárást (VÁRALLYAY, 1973). Tekintettel a mérési eljárás időigényére, ami a teljes pF-görbe esetében 2–3 hónap, módszert dolgoztunk ki a víztartókéesség-függvény értékeinek a talajtulajdonságok (szemcsefrakció értékek, térfogattömeg, szervesanyag-tartalom) alapján történő becslésére (RAJKAI et al., 1981). Foglalkoztunk a mért pF-görbe értékek leírására alkalmas matematikai modell kiválasztásával is (RAJKAI, 1983; VÁRALLYAY et al., 1979).

Elemeztük a pF-görbe leírására alkalmasnak talált háromparaméteres hatványfüggvény paraméter-értékeinek a talajtulajdonságokkal mutatott összefüggését (RAJKAI, 1988). Ezenkívül alkalmaztuk e háromparaméteres függvényt – a van Genuchten által javasolt „grafikus módszer” szerint –, a talaj vízvezetőképesség függvényének a becslésére is (RAJKAI, 1984).

Az MTA TAKI 270 talajmintát tartalmazó adatbázisán kidolgozott pF-becslő függvények becslési hibáját a tanakajdi Talajfizikai Laboratóriumban meghatározott, 590 talajmintát tartalmazó adatbázison elemeztük. Megállapítottuk, hogy az MTA TAKI mintaanyagán kidolgozott becslő függvények kielégítő pontosságú becslésre adnak lehetőséget a tanakajdi mintaanyagra is. A becslési pontosság megfigyelésünk szerint nem növekedett szignifikánsan a tanakajdi mintaanyagra érvényesített becslő függvényekkel (RAJKAI, 1987).

Becslési eljárást dolgoztunk ki svéd mintaanyagon a víztartókéesség-értékek egyszerű talajjellemzők alapján történő kiszámítására. A pF-becslés a víztartókéesség-értékek leírására a svéd mintaanyagon ugyancsak alkalmasnak

talált háromparaméteres hatványfüggvény paraméterértékeinek a talajtulajdonságok alapján történő becslésére épül (RAJKAI & VÁRALLYAY, 1992).

Tekintettel a becslési módszerek fejlődésére, valamint a talajvízmozgás modellekkel történő leírásának a mind szélesebb körű alkalmazására, időszerűnek tartjuk a pF-becslés korszerű lehetőségeinek áttekintését és a korábbi becslési eljárások továbbfejlesztését.

Jelen munkában – amelynek kutatási eredményei a T013198. számú OTKA program keretében kerültek kidolgozásra – összehasonlítjuk a regressziós pF-értékbecslés (pontbecslés), valamint a pF-görbe leírására alkalmasnak ítélt hatványfüggvény paraméterértékeire adott regressziós becslések (pF-görbebecslés) pontosságát és hatékonyságát. „Szemilineáris” eljárás alkalmazásával javítjuk a függvényparaméterek regressziós becslésére alapozott pF-görbe becslést. A pF-görbe becslés javítása érdekében a becslésbe egy mért pF-értéket is bevonunk.

Anyag és módszer

Az MTA TAKI 270 talajmintára vonatkozó adatbázisából (VÁRALLYAY, 1987; RAJKAI et al., 1981) a 8 %-nál nagyobb szervesanyag-tartalmú, a 0,1 %-nál nagyobb összes-sótartalmú, valamint a nyírségi homoktalajokat – azok sajátos víztartóképesége miatt – a további elemzésekből kizártuk. A pF-becslések kidolgozásához a válogatás után maradt 230 talaj adatait használtuk.

A talajmintákon kilenc tenzióérték beállítása mellett (pF=0; pF=0,4; pF=1; pF=1,5; pF=2; pF=2,3; pF=2,7; pF=3,4 és pF=4,2) mértük a talaj nedvességtartalmát. A becslő eljárásokba összesen nyolc talajjellemző értékét vontuk be. Ezek a szemcsefrakciók százalékos értékei a < 0,002 mm, 0,002-0,005 mm, 0,005-0,01 mm, 0,01-0,02 mm, 0,02-0,05 mm, 0,05-2,0 mm szemcseméret-tartományokban, valamint a térfogattömeg (g/cm^3), és a szervesanyag-tartalom (%). Megjegyezzük, hogy az alkalmazott szemcseméret-tartományok az MTA TAKI gyakorlatában alkalmazott felosztást követik (BUZÁS, 1993).

A 230 talaj főbb jellemzőit az 1. táblázatban foglaltuk össze. A pF-értékek talajtulajdonságok alapján történő becslésére a RAJKAI (1988) közleményben szereplő regressziós egyenleteket alkalmaztuk.

A pF-értékekre a nemlineáris regresszió módszerével a következő háromparaméteres, Brutsaert-féle hatványfüggvényt illesztettük:

$$\theta = \frac{\theta_s}{1 + (\alpha \cdot h)^n} \quad (1)$$

ahol: θ = a talaj nedvességtartalma (térfogat %);
 h = a talaj nedvességpotenciálja (cm);
 θ_s , α és n = illesztési paraméterek.

1. táblázat
Az MTA TAKI 230 talajmintát tartalmazó adatbázisának
statisztikai adatai

(1) Talaj- jellemző	(2) Átlag	(3) Szórás	Min.	Max.	(4) Mérték- egység
PF = 0	47,01	4,71	34,3	60,6	tf %
PF = 0,4	45,70	4,53	33,6	60,0	tf %
PF = 1	43,82	4,41	32,5	58,6	tf %
PF = 1,4	41,67	4,48	30,5	56,7	tf %
PF = 2	39,04	4,99	25,9	53,8	tf %
PF = 2,3	37,01	5,73	17,0	52,5	tf %
PF = 2,7	34,05	6,81	12,0	51,4	tf %
PF = 3,4	26,81	7,53	6,4	47,5	tf %
PF = 4,2	18,46	6,56	2,8	35,4	tf %
OM	1,89	1,52	0,00	7,50	%
ρ	1,41	0,13	1,03	1,75	g/cm ³
Agyag	28,73	12,53	2,8	64,0	%
Iszap1	1,44	2,87	1,2	16,1	%
Iszap2	7,46	3,28	0,4	23,4	%
Iszap3	10,63	4,00	0,4	24,2	%
Iszap4	20,91	8,77	1,2	43,5	%
Homok	24,76	17,41	0,4	85,6	%

OM: szervesanyag-tartalom (%); ρ : térfogattömeg (g/cm³); Agyag: <0,002 mm (%); Iszap1: 0,002-0,005 mm (%); Iszap2: 0,005-0,01 mm (%); Iszap3: 0,01-0,02 mm (%); Iszap4: 0,020-0,05 mm (%); Homok: 0,05-2,00 mm (%)

A mért pF-értékekre nemlineáris regresszióval az (1) egyenletet talajmintánként, és valamennyi talajminta pF-értékeire egyszerre is illesztettük. A talajmintánként illesztett pF-modellt FVG modellnek jelöljük. A valamennyi talajminta pF-értékeire történt függvényillesztést csoportillesztésnek neveztük. A csoportillesztést a mechanikai összetétel csoportok (TK1-TK3) átlag pF-görbéinek, valamint a később ismertetett nemlineáris „hangolás” esetében alkalmaztuk.

A pF-becslés nagyobb „rugalmassága” érdekében, a korábbi lépésenkénti (step-wise) eljárástól (RAJKAI, 1988) (SLR) eltérően, az (1) egyenlet paraméter-értékeit becslő regressziós egyenletekben mind a nyolc – rendelkezésre álló – talajváltozót megtartottuk. Az (1) egyenlet paraméter-értékeire történő ezen pF-görbe-becslést LR8 pF-becslő modellnek neveztük. A becslő egyenleteket a 2. táblázatban adjuk meg.

2. táblázat

A pF-görbét leíró matematikai modellek paraméterértékeit becslő egyenletek

(1) A pF-görbét leíró (1) egyenlet paramétereit becslő egyenletek	(2) Becsülő modell	N
$\theta_s = 76,8 - 17,33 \cdot FF - 0,27 \cdot OM + 32,17 \cdot Si - 40,2 \cdot p + 0,124 \cdot S/Si - 1,47 \cdot \ln(C) + 47,45 \cdot C + 22 \cdot S$	LR8	230
$\theta_s = 94,9 - 10,34 \cdot FF - 0,236 \cdot OM + 10,23 \cdot Si - 36,36 \cdot p + 0,6136 \cdot S/Si - 1,02 \cdot \ln(C) + 18,84 \cdot C + 7,43 \cdot S$	NLR8	2070
$\theta_s = 102,4 - 0,335 \cdot FC + 14,9 \cdot Si - 0,12 \cdot OM - 0,72 \cdot \ln(C) - 43,3 \cdot p - 0,657 \cdot S/Si - 8,1 \cdot FF + 39,2 \cdot C + 12,4 \cdot S$	LR8+FC	230
$\theta_s = 107,45 - 0,1323 \cdot FC - 3,291 \cdot Si - 0,095 \cdot OM - 1,672 \cdot \ln(C) - 38,25 \cdot p - 0,0678 \cdot S/Si + 0,4867 \cdot FF + 6,1242 \cdot C - 10,17 \cdot S$	NLR8+FC	1840
$\theta_s = 87,41 - 0,256 \cdot WP + 20,1 \cdot Si - 40,07 \cdot p + 0,02 \cdot OM - 2,13 \cdot \ln(C) - 0,025 \cdot S/Si - 11,9 \cdot FF + 42,4 \cdot C + 11,04 \cdot S$	LR8+WP	230
$\theta_s = 85,34 - 0,091 \cdot WP + 18,54 \cdot Si - 35,56 \cdot p - 0,0634 \cdot OM - 0,514 \cdot \ln(C) + 0,439 \cdot S/Si - 8,23 \cdot FF + 28,16 \cdot C + 4,38 \cdot S$	NLR8+WP	1840
$\ln(\alpha) = -14,92 - 835 \cdot FF - 0,23 \cdot OM + 18,66 \cdot Si - 3,83 \cdot p + 0,31 \cdot S/Si + 0,73 \cdot \ln(C) + 15,91 \cdot C + 14,8 \cdot S$	LR8	230
$\ln(\alpha) = 16,8 + 8,55 \cdot FF + 0,28 \cdot OM - 18,7 \cdot Si + 2,5 \cdot p - 0,356 \cdot S/Si - 0,326 \cdot \ln(C) - 15,2 \cdot C - 12,77 \cdot S$	NLR8	2070
$\ln(\alpha) = 0,48 - 0,2 \cdot FC + 8,28 \cdot Si - 0,14 \cdot OM - 0,62 \cdot \ln(C) - 6,87 \cdot p - 0,16 \cdot S/Si - 3 \cdot FF + 10,94 \cdot C + 8,9 \cdot S$	LR8+FC	230
$\ln(\alpha) = -0,506 - 0,18 \cdot FC + 8,05 \cdot Si - 0,15 \cdot OM - 0,205 \cdot \ln(C) - 5,69 \cdot p - 0,085 \cdot S/Si - 2,61 \cdot FF + 7,707 \cdot C + 8,2 \cdot S$	NLR8+FC	1840
$\ln(\alpha) = -5,016 - 0,24 \cdot WP + 7,37 \cdot Si + 0,04 \cdot OM + 0,12 \cdot \ln(C) - 3,69 \cdot p + 0,17 \cdot S/Si - 3,47 \cdot FF + 11,2 \cdot C + 4,52 \cdot S$	LR8+WP	230
$\ln(\alpha) = -1,38 - 0,25 \cdot WP + 2,75 \cdot Si + 0,083 \cdot OM + 0,028 \cdot \ln(C) - 3,03 \cdot p - 0,181 \cdot S/Si - 3,74 \cdot FF + 6,84 \cdot C - 0,604 \cdot S$	NLR8+WP	1840
$n = -0,45 + 0,397 \cdot FF - 0,013 \cdot OM - 0,114 \cdot Si + 0,184 \cdot p - 0,015 \cdot S/Si - 0,26 \cdot \ln(C) + 0,53 \cdot C + 0,27 \cdot S$	LR8	230
$n = -2,14 + 0,259 \cdot FF - 0,016 \cdot OM + 1,078 \cdot Si + 0,21 \cdot p - 0,034 \cdot S/Si - 0,49 \cdot \ln(C) + 2,27 \cdot C + 1,51 \cdot S$	NLR8	2070
$n = -1,45 + 0,0138 \cdot FC + 0,59 \cdot Si - 0,02 \cdot OM - 0,17 \cdot \ln(C) + 0,39 \cdot p + 0,017 \cdot S/Si + 0,0187 \cdot FF + 0,87 \cdot C + 0,66 \cdot S$	LR8+FC	230
$n = -2,17 + 0,0086 \cdot FC + 1,407 \cdot Si - 0,02 \cdot OM - 0,205 \cdot \ln(C) - 5,69 \cdot p - 0,085 \cdot S/Si - 2,61 \cdot FF + 7,707 \cdot C + 8,201 \cdot S$	NLR8+FC	1840
$n = -0,56 + 0,239 \cdot WP + 0,015 \cdot Si + 0,18 \cdot p - 0,017 \cdot OM - 0,26 \cdot \ln(C) - 0,014 \cdot S/Si + 0,34 \cdot FF + 0,58 \cdot C + 0,39 \cdot S$	LR8+WP	230
$n = -0,0802 - 0,0024 \cdot WP - 1,105 \cdot Si + 0,13 \cdot p - 0,0081 \cdot OM + 0,516 \cdot \ln(C) - 0,027 \cdot S/Si + 0,22 \cdot FF + 0,39 \cdot C - 0,65 \cdot S$	NLR8+WP	1840

p: térfogattömeg (Mg/m³); OM: szervesanyag-tartalom (%); S: homok frakció (>50 µm); Si: iszapfrakció (50-2 µm); C: agyagfrakció (<2 µm); FF: leiszapolható rész (<10 µm); ln(C): agyagfrakció logaritmus; S/Si: homok-iszap arány; FC: vízkapacitás-érték; WP: hervadáspont-érték. N = mintaelemszám.

Ezen a megoldáson kívül a következő becslési eljárásokat alkalmaztuk:

– A különböző vízpotenciálokhoz (nyomáspotenciál) tartozó pF-értékek talajtulajdonságokkal történő regressziós becslésére szolgáló regressziós egyenletekben (pontbecslés) szintén mind a nyolc mért talajtulajdonságot szerepeltettük. Ezt a becslő modellt *PLR8* modellnek nevezzük. A *PLR8* modell pF-pontbecslésre alkalmas egyenleteit a 3. táblázatban közöljük.

3. táblázat

A pF-értéket becslő nyolcváltozós lineáris egyenletek

(1) pF- érték	(2) Nyolcváltozós lineáris becslő egyenletek
pF 0 =	$86,0 + 0,1360 \cdot S - 0,124 \cdot OM - 32,60 \cdot \rho + 0,163 \cdot Si - 0,334 \cdot S/Si - 3,49 \cdot \ln(C) - 0,020 \cdot FF + 0,310 \cdot C$
pF0,4 =	$95,5 + 0,0385 \cdot S - 0,099 \cdot OM - 30,27 \cdot \rho + 0,032 \cdot Si - 0,549 \cdot S/Si - 4,84 \cdot \ln(C) + 0,018 \cdot FF + 0,212 \cdot C$
pF 1 =	$94,8 + 0,0295 \cdot S - 0,062 \cdot OM - 26,85 \cdot \rho - 0,013 \cdot Si - 0,867 \cdot S/Si - 6,50 \cdot \ln(C) + 0,053 \cdot FF + 0,220 \cdot C$
pF1,5 =	$104,6 - 0,1019 \cdot S + 0,053 \cdot OM - 22,54 \cdot \rho - 0,192 \cdot Si - 1,250 \cdot S/Si - 8,16 \cdot \ln(C) + 0,114 \cdot FF + 0,096 \cdot C$
pF 2 =	$111,2 - 0,2257 \cdot S + 0,231 \cdot OM - 17,80 \cdot \rho - 0,403 \cdot Si - 2,100 \cdot S/Si - 8,60 \cdot \ln(C) + 0,198 \cdot FF - 0,078 \cdot C$
pF2,3 =	$107,1 - 0,2863 \cdot S + 0,425 \cdot OM - 15,00 \cdot \rho - 0,514 \cdot Si - 2,300 \cdot S/Si - 6,70 \cdot \ln(C) + 0,275 \cdot FF - 0,246 \cdot C$
pF2,7 =	$117,1 - 0,5394 \cdot S + 0,702 \cdot OM - 11,60 \cdot \rho - 0,809 \cdot Si - 2,270 \cdot S/Si - 4,37 \cdot \ln(C) + 0,403 \cdot FF - 0,651 \cdot C$
pF3,4 =	$125,1 - 0,939 \cdot S + 1,050 \cdot OM - 4,86 \cdot \rho - 1,110 \cdot Si - 1,570 \cdot S/Si - 1,92 \cdot \ln(C) + 0,352 \cdot FF - 0,926 \cdot C$
pF4,2 =	$53,1 - 0,429 \cdot S + 1,130 \cdot OM + 0,62 \cdot \rho - 0,472 \cdot Si - 0,584 \cdot S/Si - 2,54 \cdot \ln(C) + 0,212 \cdot FF - 0,197 \cdot C$

A változók magyarázatát lásd a 2. táblázat után

– A pF-pontbecsléssel előállított pF-értékeket az (1) függvény nemlineáris regressziós illesztésével „simíthatjuk”. A pF-pontbecslésen alapuló pF-görbe-becslő eljárás hibáját mint *SPSLR* modellt mutatjuk be a 4. táblázatban.

A pF-becslések mért értékektől való eltérését – a pF-becslés hibáját –, talaj-mintánként kilenc pF-értékre állapítottuk meg.

– A szemilineáris becslő eljárásban az *LR8* pF-görbe-becslés lineáris regressziós egyenleteit az (1) egyenlet paramétereinek helyébe írtuk be. Ezáltal a következő 27 paraméteres egyenletet állítottunk elő:

4. táblázat

A pF-becslő módszerek szabadságfoka (DF), elemszáma (N), hibanégyzet összege (SSQ) és Akaike információs kritériuma (AIC)

(1) Becslő módszer	DF	N	SSQ	AIC
FVG	1380	2070	1847	1144
LR8	2043	2070	21073	4857
LR8+WP	1810	1840	11237	3389
LR8+FC	1810	1840	7143	2556
SLR	2057	2070	21483	4870
SPSLR	1351	2070	25482	6635
PLR8	1989	2070	18064	4646
NLR8	2043	2070	17953	4526
LR8+WP	1810	1840	9156	3013
NLR8+FC	1810	1840	6724	2445

$$\theta = \frac{a1 - b1 \cdot \ln(F\bar{F}) + b2 \cdot \rho + b3 \cdot Si + b4 \cdot OM + b5 \cdot S / Si + b6 \cdot FF + b7 \cdot S + b8 \cdot \ln(C)}{1 + (h \cdot (EXP(a2 + c1 \cdot \ln(F\bar{F})) + c2 \cdot \rho + c3 \cdot Si + c4 \cdot OM + c5 \cdot S / Si + c6 \cdot FF + c7 \cdot S + c8 \cdot \ln(C))) + (a3 + d1 \cdot \ln(F\bar{F}) + d2 \cdot \rho + d3 \cdot Si + d4 \cdot OM + d5 \cdot S / Si + d6 \cdot FF + d7 \cdot S + d8 \cdot \ln(C))}$$

ahol: h a talaj nedvességpotenciálja (cm); a további jelölések magyarázatát lásd a 2. táblázat magyarázatában.

A (2) egyenlet paramétereit a nemlineáris regresszió módszerével illesztettük (hangoltuk) 9×230, azaz az MTA TAKI adatbázisának valamennyi (2070 darab) mért pF-értékére csoport illesztéssel. A pF-görbebecslő eljárást *NLR8*-becslő modellnek neveztük. A 2. táblázatban megadott *LR8* modell egyenleteinek együttható értékei az *NLR8* modell nemlineáris optimalizációjának kezdő értékeiként szerepeltek. Az eljárást ezért szemilineárisnak nevezzük.

Abból a megfigyelésből kiindulva, hogy a becslések relatív hibája a nedvességpotenciál-értékek növekedésével növekszik (RAJKAI & VÁRALLYAY, 1992), a becslés hibájának javítása érdekében a pF-görbe egy mért értékét is bevontuk a becslésbe. RAWLS és BRAKENSIEK (1989) javaslata szerint erre először a pF = 4,2 értéket (hervadáspon = WP) alkalmaztuk. A hervadáspon-érték pF-becslésben történő alkalmazásának hatását elemeztük mind a lineáris, mind a szemilineáris becslésre. Az így nyert pF-görbebecslő modellek jelölése *LR8+WP*, illetve *NLR8+WP*.

Az egyes eljárásokkal kapott eltérésnégyzet összegeket (SSQ), annak szabadságfokát (DF), és elemszámát (N) a 4. táblázatban tüntettük fel.

A becslési hiba jellemzésére a talajmintánkénti átlaghibát (2. ábra), illetve a pF-értékenkénti átlaghibát (3. ábra) alkalmaztuk.

Megvizsgáltuk pF-értékenként a becslési hiba nagyságát. Hibásnak ítéltük a becslést, ha a hiba nagyobb volt $\pm 2,5$ nedvesség %-nál (RAJKAI et al., 1996). Tekintettel arra, hogy az MTA TAKI adatbázisában kilenc pF-érték határoz meg egy pF-görbét, bevezettük a pF-görbére vonatkozó átlagos hibát (ZAPF):

$$ZAPF = \frac{\sum_{i=1}^9 |\theta_e - \theta_m|}{9} \quad (3)$$

ahol: θ_e : a becsült nedvességtartalom (%); θ_m : a mért nedvességtartalom (%).

Hibásnak tekintettük a pF-görbe becslést, amikor $ZAPF > \pm 2,5$ %.

A pF-becslő modellek hibaértékeit (SSQ) a becslés szabadsági fokainak figyelembevételével hasonlíthatjuk össze az F-próba módszerének alkalmazásával. Az F-érték számítását a következő módon végezzük:

$$F = \frac{(SSQ_x - SSQ_A) \cdot DF_x}{SSQ_A \cdot (DF_x - DF_A)} \quad (4)$$

ahol: SSQ_x az X-becslés hibanégyzet összege; SSQ_A az A-becslés hibanégyzet összege; DF_x az X-becslés szabadságfoka; DF_A az A-becslés szabadságfoka.

Az F-próba legjobbnak, legkisebb hibájúnak az (1) egyenlet kilenc pF-értékre történt illesztését, vagyis az FVG modellt tekinti. Az FVG modellt alkalmaztuk mint a legkisebb hibájú becslő eljárást a (4) összefüggésben az A-becslő modellként.

Az alkalmazott pF-becslő modellek közül a megfelelő pontosságú kiválasztása nem egyértelmű feladat. Amennyiben a kilenc mért pF-értékre talajonként illesztett (1) függvényt alkalmazzuk és a becslő modellt ahhoz viszonyítjuk, az F-próba minden becslő modellt szignifikánsan nagyobb hibájúnak ítélt. Ismert, hogy ez a statisztikai eljárás nem kellő súllyal veszi figyelembe a modellek paraméterszámának különbözőségét. A nagyobb paraméterszámú és emiatt pontosabban illeszkedő modellt részesíti előnyben. Ennek az ismert hibának a kiküszöbölését szolgálja az Akaike-féle információs kritérium (AIC) (AKAIKE, 1974), amely a következő összefüggéssel számítható:

$$AIC = N \cdot \ln(SSQ / DF_{hiba}) + 2 \cdot P \quad (4)$$

ahol: N a mintaelemszám; SSQ a hibanégyzet összeg; DF_{hiba} a hiba szabadságfoka; P a modell paraméter száma, ami megegyezik a modell szabadságfokával (DF_{modell}); és $N = DF_{hiba} + DF_{modell}$.

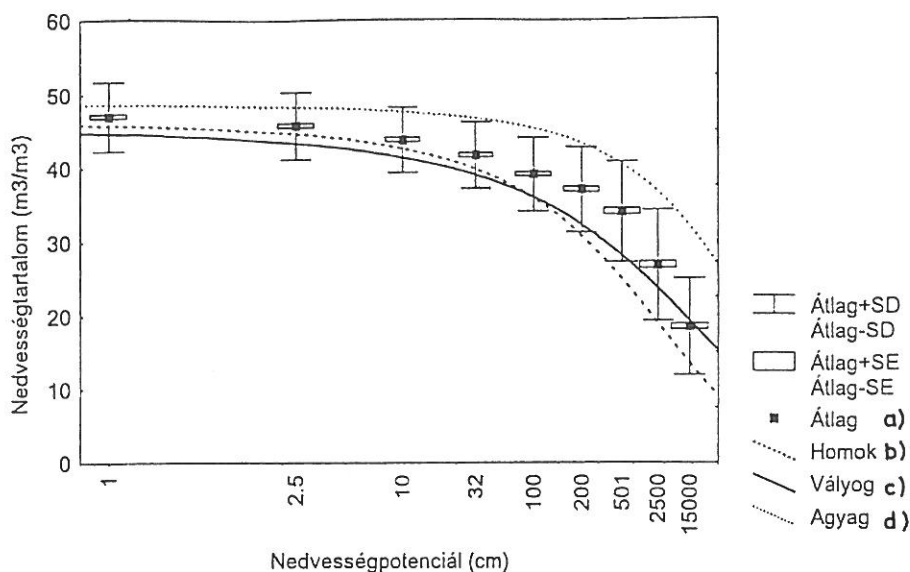
Mindmáig ez a legszélesebb körben alkalmazott modellválasztási kritérium (LINHART & ZUCCHINI, 1986). Vizsgáltuk néhány pF-becslő modell AIC értékét (4. táblázat). Az Akaike kritérium alapján az a megfelelőbb modell, amelynek az AIC értéke kisebb.

A pF-becslő eljárások jóságának jellemzésére bevezettük a becslési hatékonyság mutatót, amely a vizsgált adatbázisra százalékosan fejezi ki a jó becslések mennyiségét.

Eredmények és értékelés

A 230 talajt tartalmazó MTA TAKI adatbázis talajjellemző értékeit az 1. táblázatban foglaltuk össze.

Az 1. táblázat adataiból kiolvashatók a mintaanyagban szereplő talajok pF-görbéinek és mechanikai összetételének szélsőértékei is. Összefoglalóan elmondható, hogy a talajminták többsége vályog mechanikai összetételű, és főként csernozjom talajokat reprezentál. A nehéz mechanikai összetételű minták többnyire réti csernozjomok, réti talajok, míg a homok mechanikai összetételű talajok Duna-Tisza-közi homok vagy Duna-öntésein kialakult talajok. A mintaanyag fizikai-féleség kategóriáinak (TK1-TK3) átlag pF-görbéi az 1. ábrán láthatók. Az átlag pF-görbék a fizikai-féleség csoportok pF-értékeire csoport illesztett (1) egyenletet mutatják be. A mintaanyag erdőtalajokat nem tartalmaz.



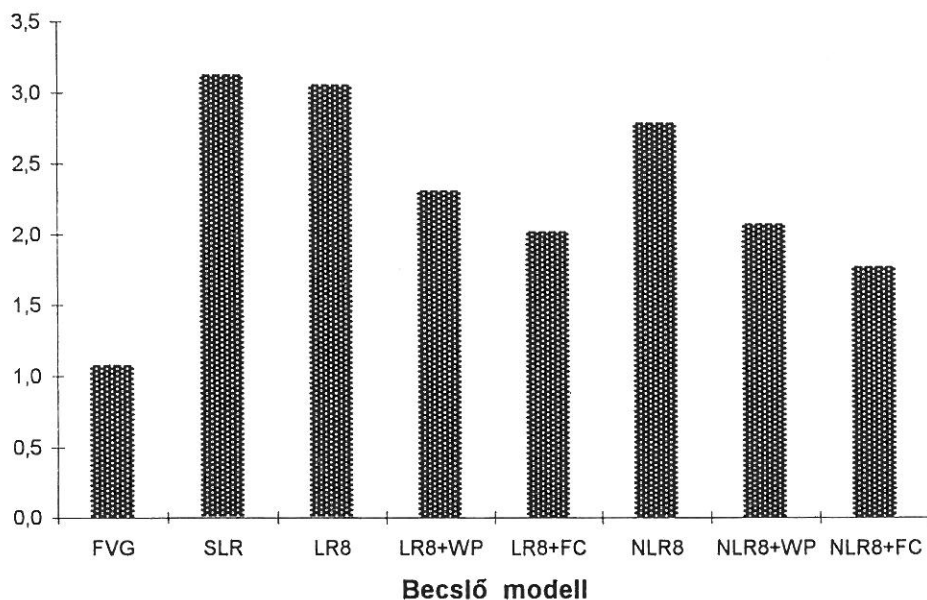
1. ábra

Az MTA TAKI adatbázis fizikai-féleség kategóriáinak átlag pF-görbéi

A nemlineáris regresszióval illesztett FVG modell talajonkénti és pF-értékenkénti átlag hibáját a 2. és a 3. ábrákon mutatjuk be. Az (1) egyenlet paramétereinek talajtulajdonságokkal való meghatározottságát mind a nyolc talajtulajdonságot magában foglaló lineáris regressziós elemzéssel vizsgáltuk (*LR8-modell*). A kapott lineáris regressziós egyenleteket a 2. táblázatban adjuk meg. A táblázatban szereplő egyenletek együttható értékeit kezdő értékeként szerepeltettük a szemilineáris becslésben. A szemilineáris, összesen 27 paraméterű (2) egyenlet paramétereinek valamennyi pF-értékre történő illesztésével (hangolásával) kapott regressziós egyenleteket (*NLR8-modell*) ugyancsak a 2. táblázat tartalmazza. A szemilineáris módszer alkalmazásának közvetlen eredménye, hogy a kezdeti regressziós paraméter-értékek változásából a talajtulajdonságoknak a víztartóképesseget leíró függvény paramétereire gyakorolt nemlineáris hatását olvashatjuk ki. Az *NLR8-modell* becslési pontosságát a 2. ábrán mutatjuk be. Látható, hogy a szemilineáris hangolás nem eredményez jelentős javulást sem a becslési hibában (3. ábra), sem a becslési hatékonyságban (4. ábra). Megjegyezzük, hogy a nemlineáris „hangolás” következtében előálló javulás mértékének elemzésére az F-próba – az azonos szabadságfokok miatt – nem alkalmazható.

Megállapíthatjuk, hogy a korábbi regressziós pontbecslés (*SLR*) hibája a nyolc talajjellemzőt használó pF-pontbecslő eljárás (*PLR8*) becslési hibájánál (4. táblázat) nagyobb.

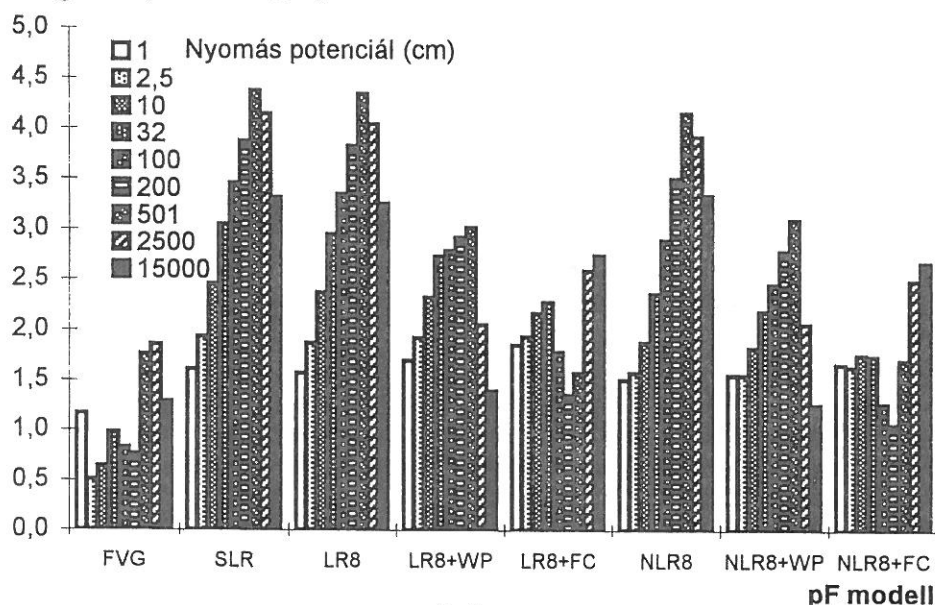
Átlag hiba (nedvesség %)



2. ábra

A pF modellek átlagos hibája az MTA TAKI adatbázisán

Átlag hiba (nedvesség %)



3. ábra

A pF modellek pF-értékenkénti hibája az MTA TAKI adatbázisán

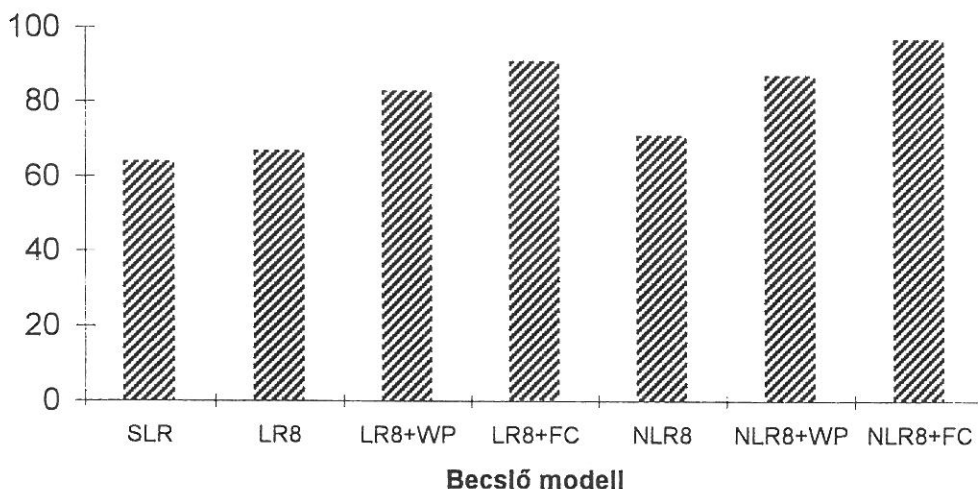
Az *LR8* pF-görbe modell, valamint a *PLR8* pontbecslő modell hibája a 230 talajra nem különbözik jelentősen (4. táblázat), de továbbra is a pontbecslés hibája kisebb az (1) függvény paraméterét becslő eljárás hibájánál. A pF-görbét leíró (1) függvény paramétereinek becslése tehát az MTA TAKI adatbázisára nem kisebb hibájú, mint a pF-pontbecslésé. Ez a megfigyelés tehát nem vág egybe THOMASSON és CARTER (1992) paraméterbecslést a pontbecslés elé helyező általános érvényű megállapításával.

Amennyiben a *PLR8* pF-pontbecslés simítását a háromparaméteres (1) egyenlettel végezzük, nem jutunk kisebb hibájú vagy nagyobb hatékonyságú becsléshez, mint az *SPSLR* modell esetében. Sőt a nagyobb modell paraméter szám következtében kedvezőtlenebb modellválasztási kritérium értéket nyerünk (nem mutatjuk be). Emiatt ezt a megoldást pF-becslésre nem javasoljuk.

A „szemilineáris” optimalizációval hangolt *NLR8* pF-görbebecslés hibamutatói szintén a 4. táblázatban találhatók. A pF-becslő modellek becslési hatékonyságát a 4. ábrán tüntettük fel. A becslési hatékonyság alapján megállapíthatjuk, hogy a nyolc talajváltozót alkalmazó pF-becslő módszerek által a hibásan becsült pF-görbéjű talajok – ahol a pF-görbére számított átlagos becslési hiba $\pm 2,5\%$ –, mennyisége nem különbözik jelentősen. A hibásan becsült talajok mennyisége a 230 talajmintát tartalmazó mintahalmazra 29 és 36 % között változik az *SLR*, az *LR8* és az *NLR8* pF-görbe-becslő módszerek esetében. A 4. ábra alapján azt is megállapíthatjuk, hogy csupán az alkalmazott

talajtulajdonságok felhasználásával a becslési hatékonyság 71 % fölé nem vihető, és az elérhető átlagos hiba közel háromszorosa az (1) függvény mért pF -értékekre vonatkozó illesztési hibájának (2. ábra). Az, hogy a $pF=2,7$ és a $pF=3,4$ értékek hibája meghaladja a többi pF -érték becslési hibáját, az többek között a pF -görbe leírására alkalmazott (1) függvény szabályos alakjának is tulajdonítható (3. ábra).

Becslési hatékonyság %

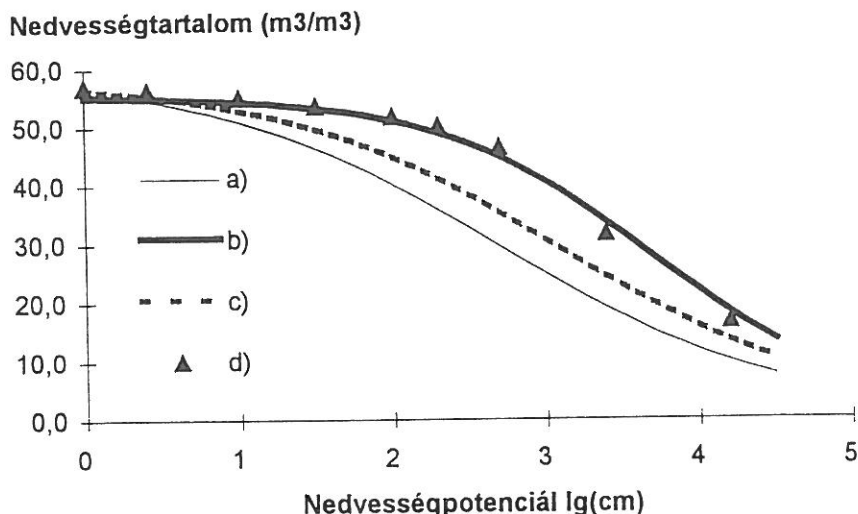


4. ábra

A pF -becslő modellek hatékonysága az MTA TAKI adatbázisán

A pF -becslés jósága egy mért pF -értéknek a becslésben való felhasználásával növelhető. RAWLS és BRAKENSIEK (1989) erre a célra a hervadásponterteket javasolta. A hervadásponterteket felhasználó pF -becslő modellek az $LR8+WP$ és annak szemilineárisan hangolt változata az $NLR8+WP$. A 2. és a 3. ábra alapján látható, hogy a hervadásponterteket is tartalmazó pF -becslő modellek átlagos hibája, valamint becslési hatékonysága (4. ábra) is szignifikánsan javult, amely eredmény egybevágh a szakirodalmi tapasztalatokkal (RAWLS & BRAKENSIEK, 1989; JANSSEN, 1992).

A pF -görbebecslés javítása érdekében elemeztük azt, hogy a hervadásponterteket helyett más mért pF -érték hogyan hat a becslési hibára és hatékonyságra. Azt tapasztaltuk, hogy ha az (1) hatványfüggvény inflexiós pontjához közeli pF -érték szerepel a becslésben, akkor az a hervadásponterteket alkalmazásához képest további jelentős javulást eredményez. A szabadföldi vízkapacitás-érték (FC) alkalmazásának eredménye a 3. és 4. ábrákon látható ($LR8+FC$ és $NLR8+FC$). A szabadföldi vízkapacitás értékének ($pF=2,3$) a becslés javításában betöltött szerepét egy öntéstalaj példáján az 5. ábra mutatja be.



5. ábra

Az LR8, LRS+WP és LR8+FC pF-becslő modellek viselkedése egy réti öntéstalaj (térfogattömeg: $1,10 \text{ Mg/m}^3$; szervesanyag-tartalom: 2,1 %) példáján. a) Lineáris regresszió, $\text{SSE}=897$; b) Lineáris modell mért $\text{pF}=2,3$ értékkel, $\text{SSE}=17$; c) Lineáris modell mért $\text{pF}=4,2$ értékkel, $\text{SSE}=320$; d) Mért pF -érték

A mért pF -értéket is alkalmazó becslő módszer hátránya a mérés költség- és időigénye. Kijelenthető viszont, hogy egyetlen bolygatatlan minta vételének, valamint csupán a $\text{pF}=2,3$ érték meghatározásának a költségével és mintegy háromhetes időigényével, a becslési megbízhatóság a szemi-lineáris hangolás eredményeként az adatbázison 97 %-ra nőtt. A becslési hiba jelentős csökkenése ellenére az *NLR8+FC* pF-becslő modell az F-próba, valamint a modell paraméterszámát is figyelembe vevő Akaike-kritérium (AIC) szerint is még mindig szignifikánsan rosszabb becslési eredményű, mint a talajonként a mért pF -értékre illesztett FVG modell (lásd 4. táblázat).

Amennyiben a felhasználás jellege megenged kisebb megbízhatóságot, a rutin talajjellemzők alkalmazása azonnali pF -érték vagy pF -görbe becslést tesz lehetővé. Természetesen ekkor a konkrét talajmintára vonatkozó becslési hiba értéke ismeretlen, azonban teszt-adatbázisunkat alapul véve az átlagos becslési hiba 3-4 %-on belül marad. Ez a hiba az ún. tájékoztató jellegű kérdésfeltevések, illetve modellalkalmazások esetében általában elfogadható. Tekintettel a felhasznált MTA TAKI adatbázis víztartóképeség-értékeinek területi reprezentációjára, megengedett, hogy a kidolgozott becslő függvényekkel nagyobb területek, pl. a mezőföldi réti csernozjomok, illetve a Magyar Alföld mezőgazdaságilag hasznosított talajainak átlagos víztartóképeségű változásait jellemezzük.

Minthogy az MTA TAKI adatbázisa erdőtalajokból származó mintákat nem tartalmaz, a jelen közleményben megadott pF-becslő egyenletek erdő és egyéb, az adatbázisban nem szereplő talajfélésekre (pl. láp, lápos-réti, szikes stb. talajok) nincsenek ellenőrizve. Ennek elvégzése további kutatási feladat.

Összefoglalás

Az MTA TAKI mintegy 50 talajszelvényből származó 230 talajmintája az Alföld elterjedtebb talajtípusainak víztartóképeség görbéit jellemzi. Az újonnan elvégzett pF-görbe és pF-érték becslések a korábbiaknál pontosabb értéket adnak. Ennek érdekében a becslésekbe nemcsak a leginkább meghatározó talajváltozók kerültek bevonásra, hanem valamennyi – esetünkben nyolc – talajtulajdonság. A nyolc talajtulajdonság bevonása a becslési hatékonyságot javítja, az elemzések szerint mintegy 6–7 %-kal. A becslési hatékonyságot tovább tudtuk növelni a lineáris egyenletek nem-lineáris „hangolásával”. Ez a megoldás módszerelméleti eredmény, amely által a becslő függvények adatbázis specifikációja megnő, viszont általános alkalmazhatósága várhatóan romlik. A becslések hatékonyságát azonban még ezzel az eljárással sem sikerült 73 % fölé emelni. Kedvezőbb becslési eredmények elérésére ad lehetőséget egy mért pF-értéknek a becslésbe történő bevonása. Az irodalom erre a hervadáspont-értéket (WP) ajánlja. A WP bevonása a becslésbe újabb 8–12 % javulást eredményezett. Elemzéseink azonban további jelentős javulást mutattak akkor, amikor a WP helyett a 200 cm-es tenzióhoz tartozó víztartóképeség értéket (FC) alkalmaztuk. Ekkor a becslési hatékonyság a nem-lineáris hangolást követően 97 %-ra nőtt, ami igen jó eredményként értékelhető.

Tekintettel arra, hogy az adatbázis Magyarország talajait csak korlátozottan reprezentálja, a pF-becslő módszerek kiterjesztése szélesebb talajspektrumot átölelő adatbázisra további kutatási feladat.

Irodalom

- AKAIKE, H., 1974. A new look at statistical model identification. IEEE Trans. on Automatic Control. AU-19. 716–722.
- BUZÁS I., (Szerk.), 1993. Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1. Fizikai, vízgazdálkodási és ásványtani talajvizsgálati módszerek. 37-41. INDA 4231 Kiadó, Budapest.
- JANSSON, P. E., 1992. PLOTPF User's Manual. Dept. of Soil Science, Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala.
- LINHART, H. & ZUCCHINI, W., 1986. Model Selection. J. Wiley & Sons. New York.
- RAJKAI K., 1983. Talajfizikai tulajdonságok ökológiai értelmezése és alkalmazása. Kandidátusi értekezés. Budapest.
- RAJKAI K., 1984. A talaj kapilláris vezetőképességének számítása a talaj pF görbéje alapján. Agrokémia és Talajtan. 33. 50–62.

- RAJKAI K., 1987. Modellek kidolgozása a talajok hidrodinamikai tulajdonságainak számítására rutin talajparaméterek alapján. (Kézirat). Budapest.
- RAJKAI K., 1988. A talaj víztartókéessége és egyéb talajtulajdonságok összefüggésének vizsgálata. *Agrokémia és Talajtan*. 36–37. 15–30.
- RAJKAI, K. & VÁRALLYAY, GY., 1992. Estimating soil water retention from simpler properties by regression techniques. In: *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils* (Eds.: VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJ, F. J. & LUND, L. J.). 417–426. University of California. Riverside, CA.
- RAJKAI K. et al., 1981. pF görbék számítása a talaj mechanikai összetétele és térfogat-tömege alapján. *Agrokémia és Talajtan*. 30. 409–438.
- RAJKAI, K. et al., 1996. Estimation of water-retention characteristics from the bulk density and particle-size distribution of Swedish soils. *Soil Sci.* 161. 832–845.
- RAWLS, W. J. & BRAKENSIEK, D. L., 1989. Estimation of soil water retention and hydraulic properties. In: *Unsaturated Flow Hydrologic Modeling Theory and Practice*. (Ed.: MOREL-SEYTOUX, H. J.) 275–300. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, The Netherlands.
- THOMASSON, A. J. & CARTER, A. D., 1992. Current and future uses of the UK soil water retention data set. In: *Proc. Int. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils*. (Eds.: VAN GENUCHTEN, M. TH., LEIJ, F. J. & LUND, L. J.) 355–358. University of California. Riverside, CA.
- VÁRALLYAY GY., 1973. A talajok nedvességpotenciálja és új berendezés annak meghatározására az alacsony (atmoszféra alatti) tenziótartományban. *Agrokémia és Talajtan*. 22. 1–22.
- VÁRALLYAY GY., 1987. A talaj vízgazdálkodása. Akadémiai doktori értekezés. I–II. kötet. Budapest.
- VÁRALLYAY GY. et al., 1979. A pF-görbék matematikai leírása. *Agrokémia és Talajtan*. 28. 15–38.

Érkezett: 1998. április 7.

Jelölések, rövidítések

- AIC: Akaike-féle információs kritérium;
- DF: az illesztett, illetve a becslő modell szabadságfoka;
- DF_A: a legkisebb hibájú (legjobb) becslés szabadságfoka;
- DF_{hiba}: a hiba szabadságfoka;
- DF_{modell}: az illesztett, illetve a becslő modell szabadságfoka;
- DF_x: a vizsgált (X) becslés szabadságfoka;
- EE: a becslés hatékonysága (%);
- FC: a 2 KPa tenziónál mért nedvességtartalom, az ún. szabadföldi vízkapacitás érték;
- F-próba: két modell hibájának statisztikai összehasonlítására szolgáló eljárás;
- FVG: a víztartókéesség függvény leírására alkalmazott háromparaméteres Brutsaert-függvény;
- görbe-becslés: a pF-görbe leírására alkalmazott Brutsaert-egyenlet paramétereinek értékeknek a becslése általi pF-becslő eljárás;
- h: a talaj nedvességpotenciálja (vízoszlop cm);
- LR8: lineáris, nyolc talajváltozót tartalmazó, a pF-görbe paraméterét becslő regressziós egyenlet;
- LR8+FC: lineáris, nyolc talajváltozót és a 200 cm tenziónál mért nedvességtartalom értékét tartalmazó pF-görbe paraméterét becslő regressziós egyenlet;
- LR8+WP: lineáris, nyolc talajváltozót és a hervadáspont mért értékét tartalmazó pF-görbe paraméterét becslő regressziós egyenlet;
- N: a minta elemszáma; esetünkben a talajminták száma, vagy a pF-értékek száma;
- n: a pF-görbét leíró (1) egyenlet paramétere;
- NLR8: lineáris, nyolc talajváltozót tartalmazó, a pF-görbe paraméterét becslő regressziós egyenlet nemlineárisan „hangolt” változata;
- NLR8+FC: lineáris, nyolc talajváltozót és a 200 cm tenziónál mért nedvességtartalom értékét tartalmazó, a pF-görbe paraméterét becslő regressziós egyenlet nemlineárisan „hangolt” változata;
- NLR8+WP: lineáris, nyolc talajváltozót és a hervadáspont mért értékét tartalmazó, a pF-görbe paraméterét becslő regressziós egyenlet nemlineárisan „hangolt” változata;
- P: a modell paramétereinek a száma;
- pF-érték: meghatározott nedvességpotenciálhoz tartozó talajnedvesség-tartalom;
- pF-görbe: a víztartókéesség függvény korábban használatos elnevezése;
- PLR8: pF-érték becslésére szolgáló nyolcváltozós lineáris regressziós egyenlet;
- pont-becslés: pF-érték becslés
- PSLR: pF-érték becslése lépésenkénti regressziós becslő egyenlettel;
- SLR: lépésenkénti regressziós lineáris regressziós pF-görbe paraméterét becslő egyenlet;
- SPSLR: a lépésenkénti regressziós pF-érték becslés eredményére a három-paraméteres Brutsaert-függvény nemlineáris illesztését is felhasználó pF-görbe becslő eljárás;
- SSQ: az illesztés, illetve a becslés eltérés hibanégyzet összege;
- SSQ_A: a legkisebb hibájú (legjobb) becslés hibanégyzet összege;
- SSQ_x: a vizsgált (X) becslés hibanégyzet összege;

szemilineáris becslés: a lineáris regressziós pF-görbe paraméterbecslésére szolgáló regressziós egyenletek nemlineáris „hangolásával” javított pF-görbebecslés;

TK1: fizikai féleség kategória, amelyben az agyag ≤ 15 %;

TK2: fizikai féleség kategória, amelyben az agyag > 15 és < 40 %;

TK3: fizikai féleség kategória, amelyben az agyag ≥ 40 %;

WP: az 1,5 MPa tenziónál mért nedvességtartalom, az ún. hervadáspont-érték;

ZAPF: a pF-becslés egy talaj pF-görbéjére vonatkozó átlagos hibája;

α : a pF-görbét leíró (1) egyenlet paramétere;

θ : a talaj nedvességtartalma (térfogat %);

θ_e : a becsült talajnedvesség-tartalom (térfogat %);

θ_m : a mért talajnedvesség-tartalom (térfogat %);

θ_s : a pF-görbét leíró (1) egyenlet paramétere.

Estimation of Soil Water Retention Characteristics (pF Curves) From Other Soil Properties

K. RAJKAI and S. KABOS

Research Institute for Soil Science and Agricultural Chemistry (RISSAC) of the
Hungarian Academy of Sciences, Budapest

Summary

The soil data base of RISSAC was used to obtain a more accurate prediction of soil water retention characteristics using easily measurable soil properties. In order to obtain improved pedotransfer (PTF) models a total of eight soil variables were included in the PTF models. The use of eight variables results in the higher flexibility of the PTF models and increases the estimation efficiency (EE) by 6-7 %. The tuning of the linear PTF models non-linearly again improves the EE by another 5 %. However, the EE did not exceed 73 %. When one measured retention parameter was involved in the PTF model the EE increased further. If wilting point retention data were used the EE increased by 8-12 %. By applying retention data for a 200 cm pressure head (FC) and adjusting the PTF model with non-linear tuning the EE reached 97 %, which is a fairly acceptable value. This PTF model (NLR8+FC), however, did not prove to be as good as the non-linearly fitted three-parameter retention model.

Considering the limited representativeness of the data base used a further extension of the water retention predictive models will need to be worked out later.

Table 1. Statistical characteristics of RISSAC's soil data base. (1) Soil characteristic. (2) Mean. (3) Standard deviation. (4) Unit. *Remarks:* OM: organic matter content (%); ρ : dry bulk density (g/cm³); Agyag = Clay: <0.002 mm (%); Iszap1 = Silt1: 0.002-0.005 mm (%); Iszap2 = Silt2: 0.005-0.010 mm (%); Iszap 3 = Silt3: 0.01-0.02 mm (%); Iszap4 = Silt4: 0.02-0.05 mm (%); Homok = Sand: 0.05-2.00 mm (%).

Table 2. Pedotransfer functions for the parameters in Equation (1). (1) Pedotransfer functions. (2) Estimative models. N = Number of cases. *Remarks:* ρ : bulk density (Mg/m³); OM: organic matter content (%); S: sand fraction (0.05-2.00 mm); Si: silt fraction (sum of 0.002-0.005 mm fractions); C: clay fraction (< 0.002 mm); FF: fine fraction (< 0.01 mm); ln(C): logarithm of the clay fraction; S/Si: sand-silt ratio; FC: water retention at 200 cm pressure head; WP: water retention at 1.5 MPa pressure head; θ_s , α , and n are the parameters of the water retention model.

Table 3. Eight-variable pedotransfer functions estimating the water retention data. (1) Retention data. (2) Eight-variable pedotransfer functions. For explanation of variables: see Table 2.

Table 4. Characteristics describing the estimative power of water retention predicting models. (1) Predicting model. DF = degree of freedom; N = number of retention data; SSQ: the sum of squared error; AIC: the value of the Akaike criterion.

Figure 1. Mean water retention characteristic curves for different texture categories of the soil data base of RISSAC. Horizontal axis: Moisture potential, cm. Vertical axis: Moisture content, m³/m³ a) Average; b) Sand; c) Loam; d) Clay.

Figure 2. Mean error of the soil water-retention models for the data base of RISSAC. Horizontal axis: Predicting model. Vertical axis: Mean error (moisture %).

Figure 3. Error of the soil water retention models at pressure heads of 1, 2.5, 10, 32, 100, 200, 501, 2500 and 15000) for the data base of RISSAC. Horizontal axis: pF model. Vertical axis: Mean error (moisture %).

Figure 4. Estimation efficiency of the soil water retention estimation models for the data base of RISSAC. Horizontal axis: Predicting model. Vertical axis: Estimation efficiency, %.

Figure 5. Example demonstrating the behaviour of three different water retention estimating models (LR8, LR8+WP and LR8+FC) in the case of meadow alluvial soil (bulk density: 1.10 Mg/m³; Organic matter content: 2.1%). a) Linear regression, SSE = 897; b) Linear model with measured pF = 2.3 values, SSE = 17; c) Linear model with measured pF = 4.2 values, SSE = 320; d) Measured pF values.